4П

УДК 53.082.7

В.Ю. Плахотник
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Искра»,
г. Луганск, Украина
official@iskra.lugansk.ua

Восстановление томографической информации в системах визуализации гамма-излучения с кодированными апертурами

В статье предложен метод восстановления томографической информации по результатам единственного наблюдения трехмерного распределения источников системой визуализации гамма-излучения с кодированной апертурой. Приведены результаты моделирования поля счетов и восстановления распределений источников в плоскостях на различном удалении. Установлено соотношение для расстояний между плоскостями разрешения.

Метод визуализации гамма-излучения с помощью кодированных апертур представляет собой двухступенчатую процедуру пространственного кодирования положения источника в поле зрения. На первой стадии направление падающего гамма-излучения кодируется с помощью расположенных перед позиционно-чувствительным детектором прозрачных и поглощающих элементов, на второй стадии зарегистрированная позиционно-чувствительным детектором картина (так называемая «тенеграмма») подвергается декодированию для получения изображения поля зрения.

Приборы для визуализации гамма-излучения, созданные на основе этой концепции пространственного кодирования направления прихода гамма-лучей, называют «системами с кодирующими масками» или «системами с кодированными апертурами» – СКА. Характерными особенностями конструкции этих систем является наличие кодирующей маски, состоящей из прозрачных и поглощающих гамма-излучение элементов, расположение которых в апертуре подчиняется строго определенным математическим закономерностям, и наличие позиционно-чувствительного детектора (ПЧД), пространственное разрешение которого должно быть согласовано с размером элемента кодирующей маски.

Фотоны источника гамма-излучения в поле зрения (ПЗ) проектируют тень маски на детектор. В течение единственного наблюдения детектор собирает «тенеграммы» от каждого источника в ПЗ, при этом информация о позиции источника кодируется сдвигом тенеграммы, а интенсивность источника – мощностью тенеграммы. Конфигурация кодирующей маски разрабатывается так, что тень маски, проектируемая источником в любой позиции в поле зрения уникальна и, следовательно, записанная тенеграмма может быть использована для восстановления положения источника. Принципы визуализации гамма-излучения с помощью кодированных апертур и некоторые способы конструирования кодирующих масок достаточно подробно изложены в [1], [2].

Счетная информация, зарегистрированная позиционно-чувствительной плоскостью в течение времени наблюдения, представляет собой суперпозицию тенеграмм от всех источников в поле зрения. При этом тенеграммы от источников, находящихся

на различных расстояниях от ПЧД и кодированной апертуры, имеют различный масштаб в соответствии с законами геометрической оптики [3]. Принцип регистрации тенеграмм от источников на различных расстояниях от ПЧД показан на рис. 1. Фокальной плоскостью в данном случае называется плоскость, источники которой проецируют базовый фрагмент маски на всю чувствительную поверхность ПЧД.

Таким образом, трехмерная реконструкция распределения источников может быть получена путем исследования данных детектирующей плоскости для теней, соответствующих источникам на различных расстояниях. Отметим, что подробный анализ тенеграмм возможен только в случае применения в качестве позиционно-чувствительной плоскости детектора непрерывного типа (гамма-камера) или пикселированного детектора, поперечный размер индивидуальных кристаллов которого значительно меньше размера тени от элемента маски.

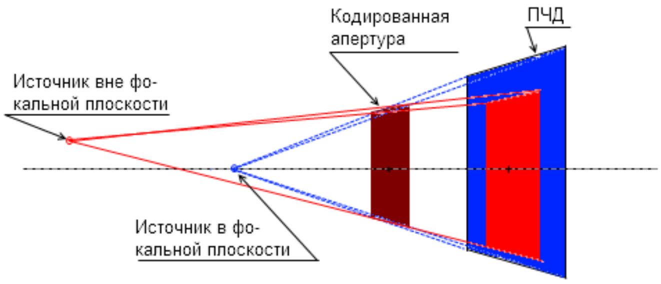


Рисунок 1. – Принцип регистрации томографической информации в СКА

Цель работы – разработка метода восстановления томографической информации по результатам однократного наблюдения объемного источника гамма-излучения системой визуализации гамма-излучения с кодированной апертурой.

При прохождении потока гамма-квантов, излучаемых источниками в поле зрения, через апертуру системы визуализации происходит его пространственная модуляция вследствие взаимодействия гамма-квантов с материалом поглощающих элементов кодирующей маски. В результате на ПЧД падает поток, отображающий некоторую часть маски. При регистрации потока излучения детектором события взаимодействия записываются в некоторый дискретный массив счетов, отображающий координаты точки взаимодействия в плоскости ПЧД и выделенную при взаимодействии энергию. Этот массив мы называем полем счетов ПЧД. Количество актов взаимодействия гамма-квантов с кристаллом ПЧД за время наблюдения пропорционально плотности потока, поэтому для получения картины тени (тенеграммы) необходимо провести интегрирование количества актов взаимодействия в элементах ПЧД, являющихся проекциями элементов кодирующей маски.

На рис. 2 показан пример поля счетов ПЧД при наблюдении трех протяженных источников, находящихся в плоскостях на различных расстояниях от кодирующей маски. Для модели использована кодирующая маска размерностью M×N = 17×17 элементов MURA [2].

В случае использования в качестве ПЧД системы визуализации детектора непрерывного типа (гамма-камеры) размеры элемента интегрирования определяются по законам геометрической оптики [3]:

$$d = a \cdot \left(1 + \frac{f}{b}\right) = a \cdot m, \tag{1}$$

где d – линейный размер элемента интегрирования ПЧД; a – размер элемента маски; f – расстояние ПЧД-маска; b – расстояние маска – плоскость источников; m – коэффициент увеличения.

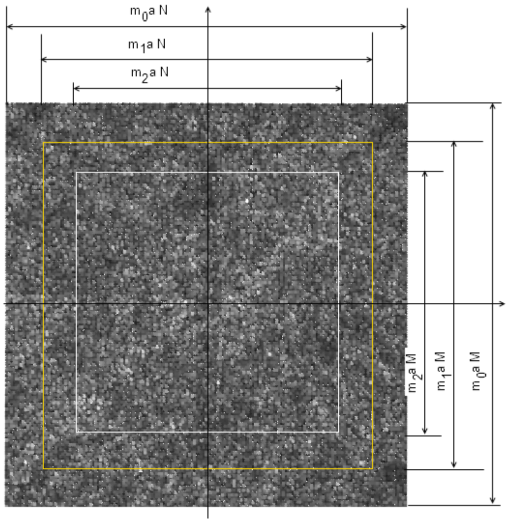


Рисунок 2 – Пример поля счетов ПЧД при наличии источников в поле зрения на различных расстояниях

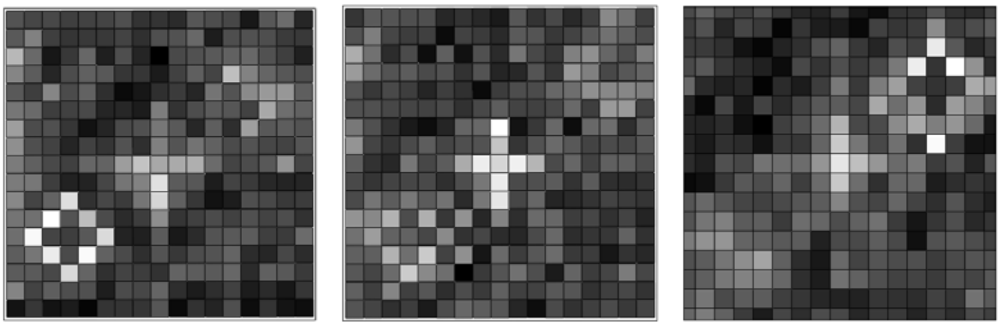
Для восстановления распределения источников излучения в поле зрения системы визуализации чаще всего используется метод корреляции [1]. В этом случае пространственное распределение источников O' получают в соответствии с формулой:

$$O'_{k,l} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} P_{i,j} \cdot G_{i+k,j+l}\,, \qquad (2)$$

где G – обрабатывающая функция, P – матрица счетов, M, N – размерность кодирующей маски. Матрица счетов P является результатом интегрирования поля счетов по площади тени элемента маски. Размерность матрицы P совпадает с размерностью базового фрагмента маски.

Источник излучения, находящийся в фокальной плоскости, создает на поверхности детектора тенеграмму в виде фрагмента маски размерностью, совпадающей с размерностью базового фрагмента маски. Источники в удаленных плоскостях проецируют больше элементов, чем размерность базового фрагмента маски. Для получения матрицы счетов, обеспечиваемой источниками в удаленных плоскостях, поле счетов ПЧД необходимо интегрировать только по некоторой части, по площадкам, размеры которых совпадают с размером тени элемента. На рис. 2 показаны размеры площадей интегрирования для получения матрицы счетов, обеспечиваемых источниками в различных плоскостях. Коэффициент увеличения m_0 соответствует фокальной плоскости. Соотношение коэффициентов увеличения: $m_0 > m_1 > m_2$. Результат восстановления источников в трех плоскостях при различных значениях коэффициента увеличения показан на рис. 3.

Источники в плоскостях ближе к ПЧД, чем фокальная плоскость, создают на поверхности ПЧД тенеграмму с количеством элементов, меньшим, чем размерность базового фрагмента. Таким образом, ПЧД регистрирует недостаточно информации для восстановления распределения источников. Поэтому распределение источников может быть восстановлено только в небольшом диапазоне удалений от фокальной плоскости.



а) б) в)

Рисунок 3 – Результат восстановления источников в различных плоскостях: а) фокальная плоскость m_0; б) $m_1 < m_0$; в) $m_2 < m_1$

В результате суперпозиции тенеграмм от источников в различных плоскостях на восстановленных изображениях просматриваются также и источники в соседних плоскостях, однако их уровень ниже уровня источников в восстанавливаемой плоскости. На рис. 3 а) кроме источника в виде ромба внизу слева отчетливо виден центральный крест из соседней плоскости. На рис. 3 б) отчетливо просматриваются следы источника внизу слева, находящегося в фокальной плоскости. Влияние соседних плоскостей особенно значимо для источников в наиболее удаленных плоскостях. Так, на рис. 3 в) источник в виде ромба вверху справа восстановлен только в виде отдельных точек. Очевидно, что такие результаты восстановления требуют дополнительной обработки для уточнения картины распределения источников в восстанавливаемой плоскости.

Для очистки изображения источников от влияния соседних плоскостей можно применить методы субтрактивной деконволюции [4]. Проведение такой обработки требует знания функции рассеяния точки (ФРТ) по глубине, т.е. зависимость отклика системы визуализации от расстояния между источником и кодированной апертурой. Исследованию таких зависимостей посвящены наши предыдущие работы [3]. Другим методом, успешно применяемым для решения задачи очистки от влияния помех и шумов, является метод максимума энтропии [5].

Представляет интерес величина томографического разрешения, обеспечиваемого методом интегрирования поля счетов. Естественно считать, что результаты восстановления источников могут различаться, если различаются результаты интегрирования поля счетов. Различие результатов интегрирования обеспечено различием площадей элементов интегрирования (тени элемента). Если поле счетов ПЧД записывается с дискретностью δ, то размеры элементов интегрирования могут минимально различаться на эту величину. Используя соотношение (1), получим

$$a \cdot (m_0 - m) = \delta , \tag{3}$$

где a – размер элемента маски, m_0 – коэффициент увеличения для фокальной плоскости, m – коэффициент увеличения для плоскости восстановления распределения источников.

Используя определение коэффициента увеличения, из (3) получим соотношение для расстояний между плоскостями разрешения:

$$\frac{1}{b_0} - \frac{1}{b} = \frac{\delta}{a \cdot f} . \tag{4}$$

Здесь b_0 – расстояние от кодирующей маски до фокальной плоскости, b – расстояние от кодирующей маски до плоскости восстановления, f – расстояние между

маской и ПЧД. Очевидно, что геометрические параметры системы визуализации гамма-излучения имеют определяющее влияние на ее томографические возможности.

Предложенный в статье метод восстановления томографической информации в системах визуализации гамма-излучения с кодированными апертурами путем интегрирования поля счетов по площади тени элемента маски дает возможность восстановить распределение источников излучения в плоскостях, находящихся на различном удалении от ПЧД системы. Особенность и ценность этого метода состоит в том, что всю информацию для восстановления томографических изображений система визуализации получает в течение единственного наблюдения трехмерного источника с одного ракурса. Получаемые в результате восстановления изображения оказываются зашумленными в результате влияния соседних слоев. Однако методы очистки изображений позволяют устранить шумы и обеспечить точную картину распределения источников. Приведенное в статье соотношение для расстояний между плоскостями разрешения позволяет установить геометрические размеры источников в плоскостях, что необходимо для восстановления трехмерного распределения источников по двумерным томографическим срезам.

Литература

1. Fenimore E.E. Coded Aperture Imaging with Uniformly Redundant Arrays // E.E. Fenimore, T.M. Cannon // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17. – № 3. – P. 337-347.
2. Gottesman S.R. New family of binary arrays for coded aperture imaging / S.R. Gottesman, E.E. Fenimore // Applied Optics. – 1989. – Vol. 28, № 20. – P. 4344-4352.
3. Плахотник В.Ю. Томографические возможности систем визуализации гамма-излучения с кодированными апертурами / В.Ю. Плахотник, Г.А. Поляков // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – № 4 (69). – С. 79-87.
4. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннелл. – Москва : Мир, 1989. – 336 с.
5. Сороко Л.М. Принцип максимума энтропии и его применение для решения обратных задач / Л.М. Сороко // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1981. – Т. 12, № 3. – С. 754-795.
6. Cannon T.M. Tomographical Imaging Using Uniformly Redundant Arrays. / T.M. Cannon, E.E. Fenimore // Applied Optics. – 1979. – Vol. 18, № 7. – P. 1052-1057.

Literatura

1. Fenimore E.E. Applied Optics. 1978. Vol. 17. № 3. P. 337-347.
2. Gottesman S. R. Applied Optics. 1989. Vol. 28. № 20. P. 4344-4352.
3. PlahotnikV.Ju. Systemni tehnolohii. Regional'nij mizhvuzivs'kyj zbirnyk naukoveh prac'.Vypusk № 4(69). Dnipropetrovs'k. 2010. S. 79-87.
4. Cannon T.M. Applied Optics. 1979. Vol. 18. № 7. P. 1052-1057.
5. Bejts R. Vosstanovlenie I rekonstrukcija izobrazhenij. Moskva : Mir. 1989. 336 s.
6. Soroko L.M. Fizika jelementarnyh chastic i atomnogo jadra. 1981. T. 12. № 3. S. 754-795.

В.Ю. Плахотнік

Відновлення томографічної інформації в системах візуалізації гамма-випромінювання з кодованими апертурами

У статті запропонований метод відновлення томографічної інформації за результатами єдиного спостереження тривимірного розподілу джерел системою візуалізації гамма-випромінювання з кодованою апертурою. Наведені результати моделювання поля лічби і відновлення розподілів джерел в площинах на різних відстанях. Встановлено співвідношення для відстаней між площинами розрізнення.

V.Yu. Plakhotnik

Tomographical Information Reconstruction in Coded Aperture Gamma-Ray Imaging Systems

The method for the tomographical information reconstruction on the results of single observation of three dimensional sources distribution by coded aperture gamma-ray imaging system is proposed in the paper. The results of the count field modeling and the reconstruction of the source distribution in the planes at different distances are presented. Ratio for the distances between resolution planes is stated.

Статья поступила в редакцию 08.08.2011.